

0718849-1

На правах рукописи

ПЛЕУХОВ Алексей Николаевич

**УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КВ РАДИОКАНАЛА
НА ЧАСТОТАХ ВЫШЕ МПЧ ЗА СЧЕТ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН
НЕОДНОРОДНОСТЯМИ СЛОЯ Е ИОНОСФЕРЫ**

05.12.01 — теоретические основы радиотехники

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук



КАЗАНЬ — 2000

Работа выполнена в Казанском государственном университете

Консультант: доктор физ. - мат. наук, профессор Сидоров В.В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Белькович О.И. / г. Казань /;

доктор физико-математических наук
профессор Иванов В.А. / г. Йошкар - Ола /;

доктор физико-математических наук
профессор Черкашин Ю.Н. / г. Москва /.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
дальней радиосвязи (НИИДАР, г. Москва).

Защита диссертации состоится " 2 " марта 2000 г. в 14³⁰ час.
в 210 ауд. физического факультета КГУ на заседании диссертационного
совета Д053.29.05 по специальности 05.12.01 - теоретические основы
радиотехники при Казанском государственном университете.

Адрес: 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18, КГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им.
Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан "20" января 2000 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук



Бухмин В.С.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000947808

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

ПРОВЕРКА
2003 г.

Актуальность проблемы. Современный мир характеризуется все возрастающими потоками информации во всех областях человеческой деятельности. Причем нарастание производства информации, ее передачи и потребления происходит такими темпами, что используемые в настоящее время системы передачи информации уже сейчас не справляются с возложенными на них задачами и вопрос улучшения их качественных и количественных характеристик остро стоит на повестке дня.

Исследования в этой области - в части каналов передачи информации - ведутся в двух направлениях:

- поиск новых каналов, обладающих повышенными качественными и количественными характеристиками,
- исследование тонкой структуры существующих каналов с целью как определения их потенциальных возможностей, так и построения систем передачи информации, адаптированных к условиям ее распространения в канале и позволяющих передавать ее со скоростью, близкой к пропускной способности.

На первом направлении достигнуты значительные успехи. К ним следует отнести активное и все расширяющееся использование спутниковых каналов радиосвязи, быстрое развитие волоконно-оптической связи, успешные испытания по передаче информации с помощью лазеров, прогрессирующее использование сантиметрового и миллиметрового диапазона радиоволн в условиях города и т.д.

С другой стороны, в связи с успехами в разработке методов прогнозирования условий распространения радиоволн, а также комплексов аппаратуры, способных диагностировать состояние каналов передачи информации, появилась реальная возможность строить адаптированные к условиям распространения радиоволн радиосистемы, что резко повысило интерес к традиционным каналам передачи информации. Одним из таких каналов, по-прежнему привлекающим внимание и через который, передается значительное количество информации, является коротковолновый радиоканал. Наблюдаемое в настоящее время, так называемое, "возрождение" КВ радиосвязи объясняется тем, что, оставаясь, по-прежнему, **самым дешевым средством связи на большие расстояния**, она приобретает новое качество - успешно разрабатываются и внедряются **цифровые методы передачи информации** через КВ радиоканал. Развитие микроэлектроники привело к созданию КВ радиосистем, обладающих

повышенными возможностями адаптации радиосистем к условиям распространения, повышенной степенью защиты передаваемой информации (что особенно привлекательно для дальней военной радиосвязи) и возможностями автоматизации процесса передачи информации, позволяющей упростить обслуживание радиосистем. Во многих случаях КВ радиосвязь рассматривается как альтернатива спутниковой связи. Имеются проекты создания сетей КВ радиосвязи, позволяющих производить передачу цифровых данных, продолжается активное развитие методов загоризонтной радиолокации с использованием коротких волн.

Исследованию коротковолнового радиоканала со всех точек зрения посвящено большое количество работ. Автор рассматривает одно из важнейших противоречий, существующих в этом канале радиосвязи, которое разрешается различными способами. Противоречие это существует между необходимостью передавать большие объемы информации непрерывно в течении суток, с одной стороны, и неустойчивостью работы коротковолнового канала при приближении рабочей частоты к максимально применимой частоте (МПЧ) трассы, когда объем передаваемой информации падает практически до нуля, с другой стороны. Поскольку это противоречие проявляется в течение значительного времени суток (от 10% до 70% в зависимости от рабочей частоты и состояния ионосферы) большой актуальностью является разработка методов, хотя бы частично компенсирующих это падение объема передаваемой информации.

Автором диссертации предлагается метод улучшения радиотехнических характеристик регулярного ионосферного КВ радиоканала на частотах выше МПЧ, основанный на использовании случайных неоднородностей электронной концентрации слоя E ионосферы турбулентного и метеорного происхождения для организации стохастического радиоканала, позволяющего обеспечить для трасс короче 2000 км круглосуточную КВ радиосвязь и для трасс длиннее 2000 км увеличить время работы в 3 ... 4 раза без смены частоты.

Преимущество этого метода перед методом, использующим сетку частот, прежде всего в том, что использование метеорных ионизаций для организации КВ радиоканала уменьшает зависимость характеристик радиоприема от состояния ионосферы, кроме того, использование всего одной частоты существенно облегчает решение вопросов электромагнитной совместимости и получения частот, улучшается такая радиотехническая характеристика КВ радиоканала, как фазовая неустойчивость.

Актуальность проблемы развития КВ радиосистем, обладающих повышенными возможностями адаптации радиосистем к условиям

Н. И. Басовского
Исследования по радиотехнике

распространения, обусловила выбор темы данной работы - Улучшение характеристик КВ радиоканала на частотах выше МПЧ за счёт использования рассеяния радиоволн неоднородностями слоя Е ионосферы.

Объектом исследования является ионосферный коротковолновый радиоканал на частотах выше максимально применимой частоты.

Предмет исследования - радиотехнические характеристики (энергетические и фазовые) стохастического радиоканала, основанного на распространении радиоволн за счет рассеяния на неоднородностях слоя Е ионосферы, и вопросы его практического использования.

Гипотеза исследования состоит в том, что использование случайных неоднородностей электронной концентрации слоя Е ионосферы турбулентного и метеорного происхождения для организации стохастического КВ радиоканала на частотах выше максимально применимой частоты позволит обеспечить для трасс короче 2000 км круглосуточную КВ радиосвязь и для более длинных трасс увеличить время работы в 3 ... 4 раза без смены частоты.

Предмет исследования и выдвинутая гипотеза привели автора к необходимости постановки следующих задач, решению которых посвящена настоящая диссертационная работа:

1. Выбор и обоснование математической модели ионосферного КВ радиоканала и оценка его пропускной способности в окрестности и выше МПЧ с учетом случайных неоднородностей электронной концентрации ионосферы. Анализ случайных неоднородностей слоя Е ионосферы, которые можно использовать для организации стохастического радиоканала, дополняющего КВ радиоканал на частотах выше МПЧ.

2. Теоретическое и экспериментальное исследование радиотехнических характеристик стохастического КВ радиоканала, в том числе:

а) теоретическая оценка мощности сигнала, рассеянного неоднородностями электронной концентрации слоя Е ионосферы,

б) экспериментальная оценка доплеровских искажений радиосигналов в КВ радиоканале,

в) определение характеристик стохастического КВ радиоканала, используя результаты экспериментальных исследований доплеровских искажений,

г) теоретическая и экспериментальная оценка фазовых характеристик (нестабильности и невязности) в радиоканале.

3. Проведение экспериментальной проверки радиотехнических характеристик метеорного радиоканала с учетом влияния на него ионосферы в системах синхронизации разнесенных шкал времени.

Научная новизна результатов исследования, выносимых на защиту, состоит в том что:

1. Предложен метод улучшения характеристик КВ радиоканала на частотах выше МПЧ, заключающийся в использовании рассеяния радиоволн на неоднородностях слоя Е ионосферы для организации стохастического КВ радиоканала, позволяющий сделать работу КВ радиоканала круглосуточной для трасс короче 2000 км и увеличить время работы в 3 ... 4 раза для трасс длиннее 2000 км без смены рабочей частоты.

Для построения математической модели ионосферного КВ радиоканала и расчетов на ее основе **разработан радиометеорный способ определения профиля электронной концентрации ионосферы на высотах 80 ... 120 км (А.с.№ 809019), основанный на использовании явления рефракции радиоволн в ионосфере и позволяющий по величине разности отражающих областей по метеорному следу, зависящему от электронной концентрации ионосферы, при многочастотном зондировании метеорного следа судить об ее профиле.**

2. В результате теоретического и экспериментального исследования радиотехнических характеристик стохастического КВ радиоканала :

а) развита теория дифракции радиоволн для наклонного падения на метеорный след, учитывающая динамику метеорного следа. Получена система уравнений, представляющая собой линейную краевую задачу типа задачи Коши, на основе решения которой сделан анализ коэффициента отражения и фазы отраженной волны для различных видов поляризации падающей на метеорный след радиоволны,

б) получены одновременные многочастотные (5, 10, 15 МГц) статистически устойчивые результаты измерений различных параметров энергетического спектра сигналов на КВ радиотрассах Москва - Казань и Иркутск - Казань в сезонно - суточных циклах. Экспериментально выявлены преобладающие механизмы доплеровских искажений - метеорный - утром, регулярной ионосферы - днем и турбулентный - вечером,

в) разработано две методики, одна из которых посвящена определению параметров спектра размеров неоднородностей по энергетическому спектру сигнала и в которой обойдено известное требование узости диаграмм направленности антенных систем путем использования для регуляризации задачи модельной аппроксимации измеренного спектра сигнала, и методика определения флуктуаций траекторных параметров при распространении радиоволн в случайно - неоднородной ионосфере по доплеровскому смещению частоты,

г) обобщены результаты работ по фазовой невязности КВ радиоканала и разработана теория фазовой невязности метеорного

радиоканала при учете влияния на него ионосферы. При экспериментальных оценках фазовых характеристик стохастического метеорного радиоканала на трассе Казань - С. Петербург впервые проведены циклы измерений и получены оценки фазовой нестабильности и относительной фазовой невзаимности метеорного радиоканала, лежащие в основе высокой точности частотно - временных измерений с использованием метеорного радиоканала.

3. В ходе экспериментальной проверки радиотехнических характеристик метеорного радиоканала с учетом влияния на него ионосферы в системах синхронизации разнесенных шкал времени:

а) впервые проведены работы по изучению электромагнитной совместимости комплекса аппаратуры метеорной синхронизации шкал времени с аппаратурой и антеннами комплекса СДВ диапазона радиоволн на трассе Казань - Минск, показавшие, что антенны СДВ диапазона радиоволн являются экраном для метеорных антенн. Степень экранирования определяется отношением длины волны к расстоянию между проводами СДВ антенны,

б) с целью реализации высоких потенциальных возможностей метеорного радиоканала по синхронизации разнесенных шкал времени разработаны и опробованы алгоритмы автоматизированного управления шкалами времени при случайном потоке неравноточных измерений, позволяющие поддерживать синхронизм шкал времени в пределах десятков наносекунд,

в) получена высокая точность сличения разнесенных шкал времени, обеспечиваемая метеорным радиоканалом, в результате проведения многолетних экспериментов на различных трассах (Казань - Москва, Москва - С. Петербург, Казань - С. Петербург). При этом впервые получена погрешность сличения разнесенных шкал времени радиометеорным способом (1971 г.) порядка 100 нс, впервые сопоставлены результаты определения величины расхождения разнесенных шкал времени метеорным и телевизионным способами на радиолинии Москва - Казань, впервые сопоставлены результаты синхронизации разнесенных шкал времени двух пунктов метеорным способом по двум каналам Казань - С. Петербург и Казань - Москва - С. Петербург. Средняя погрешность замыкания такого "треугольника" имела порядок 200 нс со среднеквадратическим отклонением порядка 200 нс.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в том, что

1) теоретические и экспериментальные оценки радиотехнических характеристик сигналов, рассеянных на метеорных и турбулентных неоднородностях ионосферы, могут быть взяты за основу при организации стохастического КВ радиоканала передачи информации на

частотах выше МПЧ, что существенно увеличивает время работы КВ радиоканала на одной частоте (тема "Тренд - 90"),

2) полученные результаты по фазовой нестабильности и невязанности метеорного радиоканала положены в основу построения систем метеорной синхронизации разнесенных шкал времени с наносекундной точностью, внедренных в системах различного назначения, что отражено в 24 научно - технических отчетах по НИР и ОКР, выполненных по соответствующим постановлениям (темы "Радиант", "Всплеск", "Калай", "Радиус", "Рапс", "Шарик", "Трамплин", "Всплеск - 2", "Цель", "Сметана", "Табажара"),

3) результаты исследования доплеровских искажений энергетического спектра КВ радиосигналов, обусловленных турбулентными и метеорными неоднородностями, использованы для оптимизации работы систем загоризонтной радиолокации, что отражено в 5 научно - технических отчетах по НИР и ОКР, выполненных по соответствующим постановлениям (темы "Тренд", "Морек", "Тренд - 90").

В диссертации обобщены результаты многолетних исследований, выполненных автором в Казанском университете в рамках плановых бюджетных НИР, в том числе "Исследование условий стабильности и невязанности метеорного распространения радиоволн и разработка методов синхронизации шкал времени с большой точностью" (№ гос. рег. 76067820, 1976 ... 1980 гг.), "Исследование условий стабильности и взаимности метеорного распространения радиоволн и разработка методов синхронизации разнесенных хранителей времени с высокой точностью" (№ гос. рег. 81007685, 1981 ... 1985 гг.), "Изучение тонкой структуры метеорного радиоканала и закономерностей рассеяния радиоволн неоднородностями ионизации нижней термосферы с целью совершенствования средств передачи информации и высокоточной синхронизации шкал времени разнесенных хранителей времени" (№ гос. рег. 029.10003513, 1986 ... 1990 гг.), "Распространение радиоволн за счет рассеяния на неоднородностях атмосферы и адаптивные к условиям распространения радиосистемы" (№ гос. рег. 01.9.10030225, 1990 ... 1995 гг.). С 1996 г. исследования проводятся по теме "Физические и радиотехнические проблемы исследования распространения радиоволн в средах со случайными неоднородностями" (№ гос. рег. 01.9.70002554, 1996 ... 2000 гг.).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Пропускная способность ионосферного коротковолнового радиоканала, рассчитанная на основе разработанной математической модели КВ радиоканала на частотах ниже МПЧ, составляет величину 8 ... 15 бит / с в полосе 1 Гц. При превышении рабочей частотой МПЧ данной трассы пропускная способность падает до нуля уже при небольшом

превышении МПЧ. Учёт рассеяния на неоднородностях ионосферы приводит к тому, что пропускная способность на частотах выше МПЧ не падает больше, чем на 10 ... 20 дБ (при относительном уровне флуктуаций электронной концентрации 10^{-2} ... 10^{-4}) по отношению к уровню пропускной способности КВ радиоканала на частотах ниже МПЧ, что говорит о возможности поддержания радиосвязи на частотах выше МПЧ за счет организации стохастического КВ радиоканала, использующего рассеяние на неоднородностях электронной концентрации ионосферы. Неоднородностями электронной концентрации, способными существенно улучшить радиотехнические характеристики регулярного ионосферного КВ радиоканала на частотах выше максимально применимой частоты, являются неоднородности слоя Е ионосферы, обусловленные атмосферной турбулентностью и вторгающимися в атмосферу Земли метеорными частицами.

2. Качество радиотехнических характеристик стохастического КВ радиоканала, основанного на рассеянии радиоволн метеорного и турбулентного происхождения, таково, что он способен обеспечить работу КВ радиоканала на частотах выше МПЧ, в частности:

а) уровень сигнала, рассеянного неоднородностями слоя Е ионосферы, могущими служить основой для организации стохастического КВ радиоканала, по отношению к уровню отраженного от ионосферы сигнала в зависимости от рабочей частоты и геофизических условий составляет для турбулентных неоднородностей - 40 ... - 90 дБ, а для метеорных следов - 60 ... - 100 дБ. Причем, поскольку интенсивность сигнала, рассеянного на турбулентных неоднородностях, невелика в утренние часы целесообразно использовать этот вид рассеяния в вечернее время, интенсивность же сигнала, рассеянного метеорными ионизациями максимальна в утренние часы, поэтому строить стохастический КВ радиоканал на частотах выше МПЧ с использованием метеорных отражений целесообразно в утренние часы. Ввиду случайности появления метеорных следов стохастический радиоканал, основанный на их использовании, целесообразнее строить прерывистым. При одинаковой пропускной способности средняя мощность передающего устройства такой радиосистемы будет более, чем на порядок меньше, чем у непрерывного стохастического радиоканала, использующего рассеяние на турбулентных неоднородностях, поэтому предпочтение при построении таких радиосистем следует, по видимому, отдавать использованию рассеяния именно на метеорных следах,

б) многолетние многочастотные экспериментальные исследования энергетических спектров сигналов, прошедших КВ радиоканал, проведенные на трассах Москва - Казань и Иркутск - Казань в период с 1986 г. по 1994 г. на частотах 5, 10, 15 МГц подтверждают

центральных журналах, сборниках статей и трудах международных конференций, 23 тезиса докладов международных и всесоюзных конференций и симпозиумов, одно авторское свидетельство на изобретение способа, 5 учебно - методических пособий и 32 научно - технических отчета по результатам научно - исследовательских и опытно - конструкторских работ, заданных постановлениями соответствующих директивных органов.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы, приложения и содержит 323 страницы текста и 69 страниц рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследований, сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В **первой главе** обоснована математическая модель КВ радиоканала. Детально проанализирована геометрия распространения радиоволн, включающая в себя различные моды распространения, формирующие принимаемый сигнал, - отражение от ионосферных слоев (E и F2), луч Педерсена, рассеяние на неоднородностях электронной концентрации ионосферы. Рассчитаны графики рабочих диапазонов частот слоев, позволяющие для трассы любой допустимой протяженности для заданного состояния ионосферы и номинала рабочей частоты определить какие слои участвуют в формировании принимаемого сигнала. Окончательная математическая модель для монохроматического сигнала учитывает специфику КВ радиоканала, заключающуюся в том, что для уменьшения поглощения на трассе и дисперсии значений радиотехнических параметров (фазы и амплитуды), в частности, из - за многолучевости, стремятся работать на возможно более высоких частотах, близких к максимально применимой для данной трассы частоте (МПЧ), когда принимаемый сигнал содержит одну моду распространения, характеризующую сигнал, отраженный от ионосферного слоя, и сумму лучей, характеризующую сигнал, рассеянный на неоднородностях ионосферы:

$$\eta(t) = \mu_o(t)\xi(t - \tau_o(t)) + \sum_{k=1}^N \mu_k(t)\xi(t - \tau_k(t)) + n(t). \quad (1)$$

Коэффициент передачи $\mu_k(t)$ КВ радиоканала, входящий в математическую модель, включает в себя энергетические потери в канале

при распространении радиоволн и коэффициент отражения от ионосферы с учетом рассеяния радиоволн на неоднородностях электронной концентрации. Поэтому достаточно большое внимание уделено энергетическим потерям при распространении (лучевой расходимости и поглощению радиоволн). Получена более общая, чем в известной монографии К. Дэвиса, формула для лучевой расходимости и произведено сравнение двух методов оценки поглощения - строгого (интегрирование вдоль траектории) и приближенного метода А. Н. Казанцева. Сравнение показало, что оценки, даваемые этими методами, отличаются примерно на 15%.

Получено выражение для коэффициента отражения от ионосферы в окрестности МПЧ с учетом рассеяния на неоднородностях электронной концентрации. Подтверждено, что без учета рассеяния на неоднородностях коэффициент отражения практически равен нулю на частотах, превышающих МПЧ более чем на 1.2 кГц. Учет рассеяния на неоднородностях приводит к тому, что коэффициент отражения на частотах выше МПЧ не стремится к нулю, а имеет значение - 50 ... - 60 дБ по отношению к коэффициенту отражения на частотах ниже МПЧ.

Получены оценки пропускной способности КВ радиоканала для модели (1) в окрестности МПЧ для данной трассы. Показано, что на частотах ниже МПЧ пропускная способность КВ радиоканала составляет величину 8 ... 15 бит /с в полосе 1 Гц. При превышении рабочей частотой МПЧ данной трассы пропускная способность падает практически до нуля уже при небольшом превышении МПЧ, на основании чего делается вывод о неспособности регулярного ионосферного КВ радиоканала обеспечить передачу информации со сколько - нибудь значимой пропускной способностью на частотах выше МПЧ. Учет рассеяния на неоднородностях приводит к тому, что пропускная способность на частотах выше МПЧ падает на 10 ... 20 дБ (при относительном уровне флуктуаций электронной концентрации 10^{-2} ... 10^{-4}) по отношению к уровню пропускной способности КВ радиоканала на частотах ниже МПЧ, что говорит о возможности поддержания радиосвязи на частотах выше МПЧ за счет использования рассеяния на неоднородностях электронной концентрации ионосферы.

В связи с этим автор диссертации ниже рассматривает неоднородности электронной концентрации слоя Е ионосферы, обусловленные атмосферной турбулентностью и вторгающимися в атмосферу Земли метеорными частицами, на предмет их использования для организации стохастического радиоканала, дополняющего КВ радиоканал и улучшающего его характеристики на частотах выше МПЧ.

Вторая глава посвящена обобщению результатов исследования случайных неоднородностей электронной концентрации слоя Е

ионосферы, рассеяние на которых может послужить основой для организации стохастического радиоканала. Автором рассматриваются два основных типа неоднородностей слоя E ионосферы - турбулентные и метеорные ионизации.

Дается обзор моделей профилей электронной концентрации регулярной ионосферы, используемых в диссертационной работе, в частности, для определения интенсивности флуктуаций электронной концентрации турбулентных образований, показываются их преимущества и недостатки. Описывается разработанный автором совместно с Сидоровым В.В. радиометеорный способ определения профиля электронной концентрации на высотах слоя E (а. с. № 809019.), заключающийся в использовании зависимости величины рефракции радиоволн в ионосфере от электронной концентрации, благодаря чему при облучении метеорного следа радиоволнами разных частот отражающие области для каждой из частот разнесены по метеорному следу на некоторое расстояние Δs , определить которое можно или используя угломер с разрешением не хуже 0.15 град., или измеряя разность времен прихода сигналов $\Delta \tau$, отраженных от метеорного следа, для разных частот при известных геометрических параметрах метеорного следа с дискретностью не хуже 50 нс. Связь между величиной Δs и интегральной электронной концентрацией ионосферы в первом приближении может быть выражена формулой:

$$\Delta s = \frac{2\pi e^2 \Delta \omega}{m \omega^3} \sin \Theta \frac{\sqrt{(a+h)^2 - a^2 \sin^2 \Theta}}{(a+h)[1 - (\frac{a}{a+h})^2 \sin^2 \Theta]^{\frac{3}{2}}} [\bar{R}, \bar{p}] \int_0^h N(h) dh, \quad (2)$$

где ω - средняя круговая частота излучения, $\Delta \omega$ - разнос между частотами, Θ - зенитный угол излучения радиоволны, h - высота метеорного следа над поверхностью Земли, $[\bar{R}, \bar{p}]$ - векторное произведение, учитывающее \bar{R} - расстояние от передатчика до метеорного следа (по лучу), \bar{p} - направляющий вектор метеорного следа.

Поскольку отражения от метеорных следов появляются достаточно часто (в радиолокационном режиме на частоте 40 МГц утром может регистрироваться до 400 отражений в час), то за короткое время можно получить статистически обеспеченные данные по интегральной электронной концентрации нижней ионосферы. Имея в составе радиолокационного комплекса устройства, измеряющие пространственные координаты метеора и его скорость, разностным методом решается задача определения профиля электронной концентрации.

Приведена общая характеристика турбулентных неоднородностей как в свободной атмосфере, так и на уровне нижней ионосферы. Автор

просуммировал экспериментальные и теоретические данные, описывающие особенности случайного ветрового поля \bar{V}_i в верхней атмосфере, и динамические эффекты, обусловленные наличием такого поля и приводящие к турбулизации нейтральной компоненты ионосферы и, как следствие, к образованию неоднородностей электронной концентрации, рассматривая электроны как пассивную примесь к нейтральным атомам, полностью повторяющим их динамику.

Проанализированы выражения для спектра турбулентных неоднородностей в энергетическом, инерционном и вязком интервалах. Показаны роль градиента скорости среднего ветра, перекачки кинетической энергии среднего движения в энергию турбулентности, магнитного поля в образовании пространственного спектра турбулентных неоднородностей в ионосфере.

Рассмотрены основные статистические закономерности метеорных радиоотражений - распределение числа метеорных радиоотражений, их длительности, амплитуды и коэффициента заполнения.

В третьей главе представлены вопросы оценки уровня сигнала, рассеянного на случайных неоднородностях ионосферы турбулентной и метеорной природы.

Рассмотрено рассеивание радиоволн КВ диапазона на турбулентных неоднородностях для случая малых (приближение однократного рассеивания) флуктуаций электронной концентрации ионосферы. Показано, что диапазон относительного изменения уровня рассеянного сигнала находится в пределах - 40 дБ ... - 90 дБ., причем, суточный ход уровня рассеянного сигнала существенно несимметричен - в утренние часы уровень сигнала, рассеянного турбулентными неоднородностями невелик, что, по видимому, связано со слабой электронной концентрацией ионосферы в ночные и утренние часы, затем идет достаточно интенсивное повышение уровня сигнала, связанное высокой концентрацией электронов в ионосфере днем, и затем вечерний постепенный спад уровня сигнала. На основе этих исследований делается вывод, что турбулентные неоднородности можно использовать для организации стохастического радиоканала, причем рассеяние на турбулентных неоднородностях целесообразнее всего использовать в послеполуденные часы.

Приведенные выше рассуждения справедливы для сред, описываемых линейным динамическим уравнением, для которых спектр размеров неоднородностей электронной концентрации $\Phi(k)$ является инвариантом движения вследствие отсутствия взаимодействия между различными спектральными составляющими. Для случая полностью развитой турбулентности статистически инвариантный характер спектральной плотности мощности, напротив, обусловлен чрезвычайно

интенсивным обменом энергией между гармониками. В большинстве прикладных задач, однако, реализуется промежуточный случай, когда, с одной стороны, нельзя пренебречь нелинейным характером динамики среды, с другой - нет условий для существования развитой турбулентности. Такова, например динамика атмосферы на высотах 90-150 км. В связи с этим представлялось интересным проследить, как изменяются статистические характеристики рассеянного поля при учете нелинейности динамики рассеивающей среды. Использование борновского приближения приводит к суммированию медленно сходящихся рядов, сопряженному со значительными вычислительными трудностями. В диссертации намечен выход, заключающийся в таком статистическом описании динамики рассеивающей среды с помощью обобщенного спектрального преобразования, которое, с одной стороны, оставляет составляющие спектра независимыми, либо корреляции между ними будут быстро убывать, с другой стороны, сохранится возможность эффективного вычисления характеристик рассеянного поля по определенному таким образом спектру среды.

Требование оценки уровня сигнала, рассеянного метеорными следами, с целью оценки характеристик стохастического радиоканала, основанного на метеорных ионизациях, привело к необходимости развития теории дифракции радиоволн на метеорном следе при наклонном падении с учетом динамики метеорного следа. В диссертации получена система уравнений, представляющих собой линейную краевую задачу типа задачи Коши:

$$\frac{d}{d\rho} \begin{bmatrix} E_m \\ \rho E_{qm} \\ \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}\right)^{1/2} H_m \\ \rho \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}\right)^{1/2} H_{qm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{n \sin \theta}{i \rho \varepsilon} & \frac{1}{i \rho} \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{\varepsilon}\right) \\ 0 & 0 & i \left(\rho - \frac{n^2}{\rho}\right) & \frac{i n \sin \theta}{\rho \varepsilon} \\ \frac{i n \sin \theta}{\rho} & \frac{i}{\rho} (\varepsilon - \sin^2 \theta) & 0 & 0 \\ i \left(\frac{n^2}{\rho} - \rho \varepsilon\right) & \frac{n \sin \theta}{i \rho} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_m \\ \rho E_{qm} \\ H_m \\ \rho H_{qm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

с краевыми условиями, которые в матричном виде можно представить как

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} n\lambda^{-2} \sin\theta & 1 & \frac{i\rho_0 I'_n(\lambda\rho_0)}{\lambda I_n(\lambda\rho_0)} & 0 \\ -\frac{i\rho_0}{\lambda} \frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \frac{I'_n(\lambda\rho_0)}{I_n(\lambda\rho_0)} & 1 & n\lambda^{-2} \sin\theta & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{zn}(\rho_0) \\ \rho_0 E_{\varphi n}(\rho_0) \\ (\frac{\mu_0}{\varepsilon_0})^{1/2} H_{zn}(\rho_0) \\ \rho_0 (\frac{\mu_0}{\varepsilon_0})^{1/2} H_{\varphi n}(\rho_0) \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ iH_n^{(1)}(\vartheta) \sin\theta & iH_n^{(1)}(\vartheta) \cos^2\theta & -\rho_0 H_n^{(1)}(\vartheta) & 0 \\ \rho_0 H_n^{(1)}(\vartheta) \cos\theta & 0 & iH_n^{(1)}(\vartheta) \sin\theta & iH_n^{(1)}(\vartheta) \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{zn}(\rho_0) \\ \rho_0 E_{\varphi n}(\rho_0) \\ (\frac{\mu_0}{\varepsilon_0})^{1/2} H_{zn}(\rho_0) \\ \rho_0 (\frac{\mu_0}{\varepsilon_0})^{1/2} H_{\varphi n}(\rho_0) \end{bmatrix} = \\
& = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{2i}{\pi} (\frac{\mu_0}{\varepsilon_0})^{1/2} H'_0 \\ \frac{2i}{\pi} E'_0 \end{bmatrix}. \tag{4}
\end{aligned}$$

Здесь $\rho = k_0 r$, ε - относительная диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon/\varepsilon_0$), θ - угол между волновым вектором падающей на метеорный след радиоволны и нормалью к метеорному следу, $\vartheta = \rho_0 \cos\theta$, $E'_0 = E_0 \sin\gamma$, $H'_0 = -(\varepsilon_0/\mu_0)^{1/2} E_0 \cos\gamma$.

На основе решения системы (3) получены выражения и сделан анализ коэффициента отражения и фазы отраженной волны для различных видов поляризации падающей на метеорный след радиоволны. Показана неадекватность результатов расчетов для цилиндрической аппроксимации метеорного следа реально получаемым данным по амплитудно - фазовым характеристикам отраженного от метеорного следа сигнала. В частности, экспериментальные данные указывают на более длительное существование резонансных изменений фазы, расчетные же значения указывают на завершение резонансных изменений по достижении максимума амплитуды отраженного сигнала.

Сделан анализ эффективного поперечника рассеяния (ЭПР) метеорного следа, полученного численным расчетом, и произведено сравнение его с ЭПР, полученным из классической формулы для сигнала, отраженного метеорным следом. Показано, что на начальной стадии

формирования метеорного следа наблюдается наибольшее отличие их друг от друга. При этом отмечена сильная зависимость от угла падения радиоволны на метеорный след. Оценка уровня сигнала, рассеянного метеорными следами на трассе Москва - Казань, по отношению к уровню сигнала, отраженного от ионосферы на частотах ниже МПЧ, показала его суточную и сезонную зависимость и величину в интервале - 60 ... - 100 дБ. Расчеты показали, что интенсивность сигнала, рассеянного на метеорных следах, максимальна в утренние часы (0 ... 8 часов), поэтому строить стохастический КВ радиоканал на частотах выше МПЧ с использованием метеорных отражений целесообразно именно в утренние часы.

На основе классических представлений рассмотрено отражение КВ радиоволн от продольно - неоднородного метеорного следа. Показано, что неоднородность ионизации вдоль метеорного следа мало сказывается на амплитуде отраженного сигнала, что подтверждает гипотезу об участии в отражении только областей метеорного следа, близлежащих к зеркальной области, но существенным образом влияет на фазовые соотношения.

На основе рассмотрения отражения и рассеяния радиоволн на случайно - неоднородной структуре ионосферы с учетом частотных искажений сигнала регулярной ионосферой построена модель энергетического спектра сигнала, прошедшего ионосферный КВ радиоканал.

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты многолетних (1986 ... 1994 гг.) исследований доплеровских искажений радиосигналов, полученные под руководством автора диссертации на трассах Москва - Казань (700 км) и Иркутск - Казань (3400 км) на трех частотах - 5, 10, 15 МГц в сезонно - суточных циклах, позволившие получить статистически устойчивые оценки параметров энергетических спектров сигналов, прошедших КВ радиоканал, - суточные хода максимума спектральной плотности мощности, полуширины спектров на разных уровнях, доплеровского смещения частоты, соответствующей максимуму спектральной плотности мощности.

Результаты получены с помощью ионосферного измерительного стенда "Спектр", разработанного и изготовленного в Казанском университете и позволяющего исследовать статистические закономерности и физическую природу искажений частотного спектра радиосигналов декаметрового диапазона радиоволн, распространяющихся в КВ радиоканале. Стенд обеспечивает измерение комплексного спектра, спектральную плотность мощности и полную мощность регистрируемых сигналов в диапазоне доплеровских частот

± 20 Гц от несущей частоты с предельной разрешающей способностью < 0.1 Гц в динамическом диапазоне до 70 дБ.

Приводится методика калибровки энергетического потенциала радиолиний по метеорным радиоотражениям, предложенная Т.Р. Кайзером и модернизированная О.И. Бельковичем, по которой экспериментально определен энергетический потенциал трассы Москва - Казань (PGS), который оказался равным 60 дБВт.

Обработке подверглись 9 циклов измерений, содержащих около 3000 реализаций спектра. Для выявления закономерностей доплеровских искажений были использованы ионосферные данные, полученные на станции вертикального зондирования, расположенной на 40 км. севернее центра трассы Москва - Казань (ст. Зименки, НИРФИ) (f - графики и ионосферные таблицы).

По ионосферным данным были построены суточные хода МПЧ. Анализ принимаемого сигнала производился в соответствии с критерием $X = \text{МПЧ}/f_p$. Если для данного слоя $X > 1$, то имеем отраженный сигнал, если $X < 1$, то - рассеянный. В соответствии с этим критерием в течение суток было выделено три интервала времени - с 0 часов до, в среднем, 8 часов (до т.н. "переходного времени"), когда ионосферные слои под влиянием солнечного излучения еще не сформировались и МПЧ находится ниже 2.9 МГц и при этом $X < 1$, с 8 часов до 18 часов, когда сильно влияние на ионосферу процессов, связанных с ионизирующим излучением Солнца и при этом $X > 1$ и с 18 часов до полуночи, когда влияние солнечного излучения ослабевает и проявляются различного рода остаточные явления в виде крупномасштабных не распавшихся неоднородностей, в этот период $X < 1$. На всех экспериментальных результатах четко проявляются эти три интервала и ниже приведем основные результаты в соответствии с ними.

Анализ суточного хода максимума спектральной плотности мощности энергетического спектра принимаемого сигнала на частотах 5, 10 и 15 МГц для трасс Москва - Казань и Иркутск - Казань показал большое разнообразие конкретных реализаций и необходимость привлечения множества дополнительных данных для выявления влияния того или иного фактора на энергетический спектр. Однако основные закономерности видны четко. К ним следует отнести достаточно сильное дневное поглощение на 5 МГц, снижающее уровень принимаемой мощности на 20 ... 30 дБ.

На частотах 10 и 15 МГц влияние ионосферы более интересно. Среднее значение максимальной спектральной плотности мощности утром на этих частотах с учетом знания величины PGS равно примерно - 130 дБ. Второй интервал (8 ... 18 часов) характеризуется более высокими значениями максимальной спектральной плотности мощности - на

частоте 10 МГц она доходит до - 100 ... - 110 дБ и на частоте 15 МГц - до - 90 ... - 100 дБ. Поскольку за время эксперимента МПЧ F2 не превышала 15 МГц, можно сделать вывод, что спектры на частоте 15 МГц сформированы неоднородностями электронной концентрации повышенной плотности, что говорит о существенном влиянии на них градиента электронной концентрации. Особенностью уровня мощности в третьем периоде является наличие двух ветвей. Одна ветвь практически повторяет ситуацию второго периода, другая ветвь и на 10 МГц, и на 15 МГц характерна низкими значениями спектральной плотности мощности в максимуме - около - 120 ... - 130 дБ на частоте 10 МГц и около - 140 ... - 145 дБ на частоте 15 МГц. Высокие значения мощности первой ветви в сочетании с узкими спектрами объясняются либо односкачковым распространением с отражением от слоя F2 (на частоте 10 МГц), что подтверждается ионосферными данными, либо отражением от плотных экранирующих слоёв E_s (f_oE_s доходит до 7.4 МГц), либо, по-видимому, распространением через спорадический слой E_s с резким градиентом электронной концентрации по высоте при сравнительно небольших абсолютных значениях f_oE_s .

Зимние эксперименты подтвердили основные закономерности, отмеченные в летних.

На трассе Иркутск-Казань имеем несколько иную картину. Прежде всего основным отражающим слоем на этой трассе является слой F2, поскольку отражение от слоя E дает сигнал на трассе протяженностью максимум 2000 км. Для трассы 3400 км МПЧ слоя E благодаря большим зенитным углам падения радиоволны на слой практически всегда больше 5 МГц для тех значений критических частот, которые мы имеем на трассе Москва-Казань. Поэтому прохождение радиоволн частоты 5 МГц практически не наблюдалось. Распространение радиоволн на такой трассе наблюдается только в периоды, когда слоя E практически нет, а слой F2 располагается достаточно высоко, что бывает утром и вечером. В это время МПЧ достаточно невелико (в районе 10 МГц). Поэтому за прохождение радиоволн частот в районе и выше 10 МГц ответственны, в основном, крупномасштабные неоднородности слоя F2, т.е. утром (примерно до 8 часов) и вечером (с 18 часов). Поэтому анализ в диссертации проведен для частот 10 и 15 МГц с обработкой, где это возможно, данных для 5 МГц. Характерной особенностью суточного хода спектральной плотности мощности для этой трассы является наличие двух максимумов, что связано с сильным дневным поглощением в слоях D и E, снижающим уровень сигнала на 40 ... 50 дБ.

Суточный ход полуширины энергетического сигнала, прошедшего KB радиоканал, можно, как и при анализе уровня мощности, разделить на три интервала, отличающихся различными величинами полуширин.

Измерения, проведенные для двух уровней - на 10 и 20 дБ ниже максимума спектра, показали, что на трассе Москва - Казань первый интервал характеризуется широкими спектрами по уровню - 10 дБ на частоте 5 МГц - до 1 Гц, на частоте 10 МГц - до 1.5 Гц, на частоте 15 МГц - до 2...2.5 Гц, второй интервал дает более узкие спектры - на частоте 10 МГц, если МПЧФ2 > 10 МГц, до 0.25 ... 0.4 Гц и третий интервал, характеризуемый двумя ветвями в уровне сигнала, дает узкие спектры для высокого уровня (на частоте 10 МГц - 0.3 Гц) и широкие - для низкого уровня (на частоте 10 МГц - 1.4 Гц).

Ряд циклов, проведенных на трассе Иркутск - Казань, показал, что неоднородности слоя F2 уширяют спектр до 2.0 Гц на 10 МГц.

Анализ доплеровского смещения максимума энергетического спектра сигнала показал, что и здесь (имеется ввиду трасса Москва-Казань) справедливо разделение суточного хода на три интервала - утро, день, вечер-ночь. Утром, когда отсутствует отражение от регулярных слоёв, наблюдаются отклонения от нулевой доплеровской частоты с большой дисперсией. Явного среднего хода частоты, соответствующей максимуму спектра, в большинстве случаев выявить не удастся, хотя имеются дни, когда наблюдается небольшой, но четкий тренд. Разброс смещений утром достигает 1.5 Гц. Днем, когда в отражении участвуют ионосферные слои, наблюдается уменьшение дисперсии (разброс составляет величину 0.2 Гц) с небольшой линейной зависимостью среднего значения от времени. Вечером опять наблюдается большая дисперсия с разбросом до 1.5 Гц.

Обработка большого массива данных показала устойчивость этих данных.

С целью выявления механизмов ионосферы, влияющих на доплеровские искажения сигналов, прошедших КВ радиоканал, была проанализирована динамика формы энергетического спектра в течение суток. Показано, что форма энергетического спектра принимаемого сигнала описывается выражением

$$W(\Omega) = C_1(\Theta) \cdot \exp\left\{-\frac{(\Omega - \bar{\Omega}(\Theta))^2}{2\sigma_p^2}\right\} + C_2(\Theta) \cdot \exp\left\{-\frac{(\Omega - \bar{\Omega}(\Theta))^{\gamma(\Theta)}}{2\sigma_1^2(\Theta)}\right\} + \\ + C_3(\Theta) \cdot \exp\left\{-\frac{|\Omega - \bar{\Omega}(\Theta)|^{0.75}}{\delta_f}\right\} + C_4(\Theta) \cdot \exp\left\{-\frac{(\Omega - \bar{\Omega}(\Theta))^2}{2\sigma_m^2}\right\}. \quad (5)$$

Первый член, предполагается, описывает влияние регулярных слоев ионосферы, второй член - турбулентных неоднородностей, третий и четвертый - метеорных ионизаций.

Суточный ход величины коэффициентов перед экспонентами и сравнение с экспериментально полученными спектрами позволил

Расчет величины фазовой невязанности, проведенный для радиолиний, расположенных под разными углами к геомагнитному полю, для различных ионосферных условий, показал, что основной вклад в невязанность фазы дает невязанность коэффициента отражения от метеорного следа, которая существенно зависит от соотношений между векторами поляризации падающих на метеорный след радиоволн и осью следа. Максимальная величина невязанности, достигающая 1 рад., реализуется тогда, когда радиоволны, падающие на метеорный след, имеют, с одной стороны, вектор поляризации, параллельный оси метеорного следа, с другой стороны, - перпендикулярный метеорному следу.

Чисто ионосферные эффекты (без учета метеорного следа) дают величину невязанности в пределах 0.2 рад.

Экспериментальное изучение фазовой нестабильности и невязанности метеорного радиоканала, проведенное на радиолинии Казань - С. Петербург, показало, что среднее значение скорости изменения фазы в одну сторону составило величину 4.2 π рад / с при максимальном значении - 16 π рад / с, средняя скорость изменения относительной фазовой невязанности составляет величину $\sim \pi$ рад / с при максимальном значении - 3 π рад / с.

Использование различных критериев при обработке результатов позволило детализировать эти величины для различных типов метеорных следов - недоуплотненных, переходных, переуплотненных. Одним таких критериев был выбран критерий оценки типа метеорного следа по величине разности относительных амплитуд метеорных сигналов во встречных направлениях:

$$\delta A = \left| \frac{A_1(t)}{A_1(t)} - \frac{A_2(t)}{A_2(t)} \right|.$$

Все полученные отражения были разделены на 2 группы, одна из которых имела $\delta A < 0.05$, а другая имела $\delta A > 0.05$. Выяснилось, что контингенты отражений в этих группах очень близки контингентам, отнесенным при классификации по форме амплитудно - временных характеристик к группам недоуплотненных и переуплотненных следов, хотя имелось некоторое число переуплотненных следов, не обнаруживших различий в $A(t)$, и наоборот.

В диссертации приведены гистограммы плотности распределения $d\Theta(t)/dt$ для этих 2-х групп отражений. Распределение $d\Theta(t)/dt$ для $\delta A < 0.05$ является значительно более узким, чем для $\delta A > 0.05$. Так $\overline{d\Theta(t)/dt} = 0.64 \pi$ рад./с для первого случая и $\overline{d\Theta(t)/dt} = 1.46 \pi$ рад./с для

второго случая. Соответственно различаются и дисперсии (D). Так $\sqrt{D} = 0.33\pi$ рад./с для первого случая и $\sqrt{D} = 0.79\pi$ рад./с для второго случая. Таким образом, по критерию совпадения формы $A_1(t)$ и $A_2(t)$ можно отобрать отражения с $d\Theta(t)/dt \geq 1.5\pi$, однако этот критерий не дает гарантии, что отражения будут взаимны по фазе.

Исследование вопроса сохранения разностной фазы во встречных радиоканалах при метеорном распространении при переходе от одного метеорного отражения к другому показало, что измеренное среднее значение ухода фазы разнесенных стандартов частоты соответствует взаимному уходу двух рубидиевых стандартов частоты Ч1 - 50, что подтверждает способность метеорного радиоканала не только с высокой точностью определять величину расхождения разнесенных шкал времени в течение одного метеорного отражения, но и следить за ходом этого расхождения на любом временном отрезке.

В шестой главе рассматриваются вопросы практического использования метеорного радиоканала.

Делается обзор состояния работ в области передачи информации через метеорный радиоканал. Показывается актуальность разработок в области метеорной радиосвязи, связанная с ошеломляющим прогрессом в развитии компьютеров и микропроцессорной техники, появлением мощных и экономичных твердотельных передатчиков, переходом в радиоэлектронике на новую элементную базу. Резко возросло число статей, описывающих как теоретические разработки в области метеорной радиосвязи, касающиеся оценки эффективности работы метеорного радиоканала в целом, сетей метеорной радиосвязи, организации пакетного режима передачи информации, так и проведенные эксперименты (например, в США на радиолинии длиной 1200 км., соединяющей Чарльстон (штат Южная Каролина) и Верону (штат Нью-Йорк), в 1994 г. был проведен эксперимент, в результате которого было получено, что максимальная пропускная способность в течении часа составила 4 кбит /с при энергетическом потенциале радиолинии 80 дБВт ($P_{\text{пер}}G_{\text{пер}}G_{\text{пр}}$) и частоте в диапазоне 40 ... 50 МГц. Диапазон изменения скорости передачи в зависимости от отношения сигнал / шум находился в пределах 8 ... 128 кбит /с).

Системы метеорной связи появляются как в странах, имеющих очень высокий уровень развития радиокommunikационных систем (США, Канаде, Европе), так и развивающихся странах (Индии, Южной Африке).

В этой главе описывается эксперимент по электромагнитной совместимости систем метеорной радиосвязи с аппаратурой СДВ диапазона, проведенный с целью выявления экранирующего влияния

антенн СДВ диапазона на антенны метеорных радиосистем, впервые проведенный на радиолинии Казань - Минск.

Антенны метеорной станции, расположенной под г. Минском, представляли из себя двухрядную двухэтажную антенну типа "волновой канал". Ширина диаграммы направленности составляла 25 град. как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. СДВ -антенна представляла собой правильный шестиугольник, подвешенный на высоте около 200 м., из центра которого веерообразно расходятся металлические провода с углом между проводами примерно 10 град.. Размеры СДВ - антенны, служащей в нашем случае экраном для метеорного пункта радиосвязи, гораздо больше размеров антенны метеорного пункта, располагающегося под СДВ - антенной.

Эксперимент показал, что антенна СДВ диапазона, интерпретируемая как дифракционная решетка с переменным шагом, является экраном для антенн метеорных систем радиосвязи, степень экранирования радиоотражений от метеорных следов зависит от степени перекрытия экраном диаграммы направленности антенны метеорной системы радиосвязи, длины трассы и соотношения между длиной радиоволны и шагом дифракционной решетки.

Далее в этой главе описаны проводимые с 1968 года эксперименты по синхронизации разнесенных шкал времени через метеорный радиоканал, в которых автор принимал участие с самого начала.

В диссертации анализируются два основных активных способа синхронизации - радиодальномерный способ с активным ответом (способ "запрос - ответ") и способ встречной передачи отметок времени ("встречный" способ). Приводятся оценки погрешности, обеспечиваемой этими способами.

С целью увеличения точности синхронизации автор разработал и внедрил в создаваемые в Казанском университете комплексы аппаратуры метеорной синхронизации шкал времени ряд разработок - двухпороговое выделение сигнала, позволившее уменьшить погрешность синхронизации шкал времени примерно в 3 раза и ряд алгоритмов управления шкалами времени при случайном потоке неравноточных измерений, позволивших уменьшить погрешность "ведения" вторичной шкалы времени до десятка наносекунд. В диссертации описаны эти разработки, при этом особое внимание уделено оценке эффективности разработанных алгоритмов управления шкалами времени.

При анализе результатов экспериментов разнообразие механизмов образования погрешности, их случайный характер, неопределенность отношения сигнал/шум делают проблему экспериментальной оценки составляющих погрешности метеорных средств синхронизации весьма сложной. Поэтому, в диссертации представлены измерения, полученные в

пределах отдельных метеорных отражений, а также на совокупности всех радиоотражений, полученных в течение отдельных сеансов. Из представленных графиков следует, что на отдельных метеорных отражениях была получена погрешность сличения шкал времени, составляющая величину 30 ... 60 нс, в целом в течение отдельных сеансов была получена погрешность 80 ... 90 нс.

Сопоставление погрешности сличения шкал времени с результатами сличения шкал времени посредством телевизионной сети показало, оба этих метода имеют примерно равные погрешности в пределах 70 нс.

В диссертации представлен эксперимент по метеорной синхронизации шкал времени трех пунктов, объединенных в замкнутую систему. Целью этого эксперимента было сравнение погрешности сличения шкал времени двух пунктов по двум независимым радиоканалам. Эксперимент проводился на "треугольнике" С. Петербург - Казань - Москва. Определялась т.н. ошибка "замыкания" треугольника $\Delta T_{\Delta}(t) = \Delta t_{AB}(t) + \Delta t_{BC}(t) - \Delta t_{AC}(t)$, где $\Delta t_{AB}(t)$ – ход шкалы в пункте А отсчитанный по шкале в пункте В; $\Delta t_{BC}(t)$ – ход шкалы в пункте В отсчитанный по шкале в пункте С; и $\Delta t_{AC}(t)$ – ход шкалы в пункте А отсчитанной по шкале в пункте С. За время проведения эксперимента усредненное значение $\Delta \bar{T}_{\Delta} = 0.2$ мкс при среднеквадратическом значении $\sigma_{\Delta} = 0.2$ мкс

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные требования к качеству КВ радиоканала, во - первых, как одному из самых дешёвых радиоканалов для дальней радиосвязи, особенно в полярных широтах и акваториях океанов, с возможностью передачи цифровой информации и, во - вторых, как радиоканалу в системах загоризонтной радиолокации, привели к необходимости теоретических и экспериментальных исследований распространения радиоволн на частотах выше максимально применимой частоты.

Результаты этих исследований, представленные в диссертации, позволили получить следующие основные выводы.

1. Предложен метод улучшения радиотехнических характеристик ионосферного КВ радиоканала на частотах выше МПЧ, основанный на использовании случайных неоднородностей электронной концентрации слоя Е ионосферы турбулентного и метеорного происхождения для организации стохастического радиоканала, позволяющего обеспечить для трасс короче 2000 км круглосуточную КВ радиосвязь и для трасс длиннее 2000 км увеличить время работы в 3 ... 4 раза без смены частоты.

2. Построена математическая модель КВ радиоканала и показано, что пропускная способность КВ радиоканала, рассчитанная с использованием этой модели, на частотах выше максимально применимой частоты за счет рассеяния на неоднородностях поддерживается на уровне - 10 ... - 20 дБ (при относительном уровне флуктуаций электронной концентрации 10^{-2} ... 10^{-4}) по отношению к уровню пропускной способности КВ радиоканала на частотах ниже МПЧ.

3. Проведен анализ случайных неоднородностей электронной концентрации слоя Е ионосферы, могущих послужить основой для создания стохастического КВ радиоканала на частотах выше МПЧ и показано, что в качестве таких неоднородностей могут быть взяты неоднородности, обусловленные атмосферной турбулентностью, и неоднородности, образованные метеорными частицами, в огромном количестве вторгающимися в атмосферу Земли. При этом обобщены модели и способы определения профиля электронной концентрации ионосферы и разработан радиометеорный способ определения профиля электронной концентрации ионосферы на высотах 80 ... 120 км (А.с.№ 809019).

4. Развита теория дифракции радиоволн для наклонного падения на метеорный след, учитывающая динамику метеорного следа, на основе которой получены оценки уровня сигнала, рассеянного на метеорных неоднородностях.

5. Показано, что для организации стохастического КВ радиоканала с уровнем сигнала на 50 ... 60 дБ ниже отраженного от ионосферы необходимо использовать метеорные ионизации утром и турбулентные неоднородности вечером. Ввиду случайности появления метеорных следов стохастический радиоканал, основанный на их использовании, целесообразнее строить прерывистым. При одинаковой пропускной способности средняя мощность передающего устройства такой радиосистемы будет более, чем на порядок меньше, чем у непрерывного стохастического радиоканала, использующего рассеяние на турбулентных неоднородностях, поэтому предпочтение при построении таких радиосистем следует, по видимому, отдавать использованию рассеяния именно на метеорных следах,

6. Подтверждены многолетними (1986 ... 1994 гг.) экспериментами, проведенными на трассах Москва - Казань и Иркутск - Казань на частотах 5, 10 и 15 МГц по исследованию доплеровских искажений сигналов, теоретические положения о том, что основными механизмами, действующими в КВ радиоканале на частотах выше МПЧ являются турбулентный и метеорный механизмы: метеоры наиболее активно влияют на КВ распространение утром, а турбулентные неоднородности - вечером.

Получены статистически устойчивые значения параметров, характеризующих энергетические спектры принимаемых радиосигналов, - максимума спектральной плотности мощности, полуширины спектров на разных уровнях, доплеровского смещения частоты.

7. Разработана методика обработки получаемых данных, позволяющая по энергетическому спектру принимаемого сигнала, обходя известное требование узости диаграмм направленности антенных систем путем использования для регуляризации задачи модельной аппроксимации измеренного энергетического спектра сигнала, определить характерные масштабы неоднородностей ионосферы.

8. Разработана методика, позволяющая по доплеровскому смещению частоты КВ - радиосигнала оценить флуктуации параметров траектории распространения сигнала ввиду значимости корреляционной связи между ними.

9. Разработана теория фазовой невязимности метеорного радиоканала с учетом влияния на него ионосферы, показавшая, что фазовая невязимность радиоканала, обусловлена, в основном, невязимностью комплексного коэффициента отражения от метеорного следа и может достигать значений 1 рад.

10. Изучены экспериментально на радиолинии Казань - С.-Петербург фазовые характеристики (нестабильность и невязимность) метеорного радиоканала. Получено, что среднее значение скорости изменения фазы в одну сторону составляет величину 4.2π рад/с при максимальном значении - 16π рад/с, а среднее значение скорости изменения относительной фазовой невязимности составляет величину $\sim \pi$ рад/с при максимальном значении - 3π рад/с.

11. Проведены эксперименты по исследованию пригодности метеорного радиоканала для синхронизации разнесенных шкал времени и получены погрешности сличения разнесенных шкал времени порядка 100 нс. Сопоставлены результаты определения величины расхождения разнесенных шкал времени метеорным и телевизионным способами на радиолинии Москва - Казань (установлено, что как метеорный, так и телевизионный способ дают примерно одинаковые погрешности в 70 нс), сопоставлены результаты синхронизации разнесенных шкал времени двух пунктов метеорным способом по двум каналам Казань - С.-Петербург и Казань - Москва - С.-Петербург (средняя погрешность замыкания такого "треугольника" имеет порядок 200 нс со среднеквадратическим отклонением 200 нс).

12. Проведен эксперимент по электромагнитной совместимости аппаратуры метеорной синхронизации с аппаратурой СДВ диапазона, проведенный на радиолинии Казань - Минск с целью выявления экранирующего влияния антенн СДВ диапазона на антенны метеорных

радиосистем подтверждает, что антенна СДВ диапазона, интерпретируемая как дифракционная решетка с переменным шагом, является экраном для антенн метеорных систем радиосвязи.

Подводя итог теоретическим и экспериментальным исследованиям, представленным в диссертации, можно сказать, что характеристики стохастического радиоканала, образованного неоднородностями слоя Е ионосферы и составляющие предмет исследования настоящей диссертации позволяют обеспечить для трасс короче 2000 км круглосуточную КВ радиосвязь и для трасс длиннее 2000 км увеличить время работы в 3 ... 4 раза без смены рабочей частоты. Предпочтение следует отдавать прерывистому метеорному радиоканалу, который при одинаковой пропускной способности с непрерывным каналом, использующим рассеяние на турбулентных неоднородностях, требует более, чем на порядок меньшую мощность передающего устройства. Причем, метеорный радиоканал обладает настолько высокими фазовыми характеристиками, что позволяет использовать его в качестве самостоятельного радиоканала для синхронизации разнесенных на расстояние до 2000 км шкал времени.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

1. Плеухов А.Н., Сидоров В.В. К вопросу об определении временного положения импульсов, отраженных от метеорных следов // Метеорное распространение радиоволн : Сборник. - Казань. : Изд - во Казан. гос. ун - та, 1970. - Вып. 7. - С. 116 - 122.

2. Плеухов А.Н., Сидоров В.В. Влияние условий в ионосфере на метеорное распространение радиоимпульсов // Метеорное распространение радиоволн : Сборник. - Казань.: Изд - во Казан.гос.ун-та, 1971. - Вып.8. - С.66 - 73.

3. Плеухов А.Н., Сидоров В.В. Расчет влияния ионосферы на метеорное распространение радиоимпульсов // Метеорное распространение радиоволн : Сборник.- Казань.: Изд - во КГУ. - 1975. - вып.10. - с.49 - 52.

4. Плеухов А.Н., Сидоров В.В. Влияние ионосферы на частотную дисперсию сигналов, передаваемых по метеорному радиоканалу // XI Всес. конф. по Распространению радиоволн: Тез. докл. ч.4. - Казань - 1975. - С.186 - 189.

5. Зиятдинов Р.Х., Костылев К.В., Костылева Т.А., Плеухов А.Н., Сидоров В.В. К вопросу о прогнозировании величины расхождения шкал времени по данным радиометеорного метода // Метеорное

распространение радиоволн : Сборник. - Казань.: Изд - во Казан. гос. ун - та, 1976. - Вып. 13. - С.216 - 222.

6. Сидоров В.В., Плеухов А.Н., Зиятдинов Р.Х. Управление шкалами времени при случайном потоке измерений // Метеорное распространение радиоволн : Сборник. - Казань. : Изд - во Казан. гос. ун - та, 1979. - Вып. 15. - С.105 - 114.

7. Плеухов А.Н., Сидоров В.В. Способ определения концентрации электронов в ионосферы. А.с. № 809019 с приоритетом от 19.06.78// Б.И. 1981.- 8.- С.158.

8. Сидоров В.В., Курганов А.Р., Плеухов А.Н., Овчинников В.В., Хузяшев Р.Г. Экспериментальные исследования фазовой нестабильности и относительной фазовой невязки при метеорном и E_s распространении радиоволн // Метеорное распространение радиоволн: Сборник. - Казань: Изд-во Казан.гос.ун-та,1981.- Вып.17.-С.30 - 39.

9. Плеухов А.Н., Хузяшев Р.Г. Анализ формулы мощности при отражении радиоволн от метеорного следа // XIII Всес. конф. по Распространению радиоволн: Тез. докл. ч.I. - Горький. - 1981. - С.87 - 90.

10. Плеухов А.Н., Хузяшев Р.Г. Решение дифракционной задачи рассеивания на метеорном следе // Метеорное распространение радиоволн: Сборник. - Казань.: Изд - во Казан. гос.ун-та, 1983. - Вып.18. - С.3 - 14.

11. Курганов А.Р., Овчинников В.В., Плеухов А.Н., Хузяшев Р.Г., Сидоров В.В. Экспериментальное исследование фазовой невязки и предельной точности метеорных средств сверки шкал времени // Всес. конф. "Применение время - частотных средств и методов измерений в народном хозяйстве": Тез. докл.- Москва,1983.-С.165-166.

12. Плеухов А.Н. Влияние анизотропной ионосферы на фазовую невязку распространения радиоволн в метеорном канале // Метеорное распространение радиоволн: Сборник. - Казань: Изд-во Казан.гос.ун-та,1984.-Вып.19.-С.87-93.

13. Сидоров В.В., Хузяшев Р.Г., Плеухов А.Н. Влияние эффекта Фарадея в ионосфере на невязку метеорного радиоканала // Изв. ВУЗов. Радиофизика. - 1984.- Т.27, №8.- С.1075-1077.

14. Плеухов А.Н. Невязка радиоволн в метеорном радиоканале // Изв. ВУЗов. Радиофизика.-1988.-Т.31,№5.-С.545-549.

15. Панковец В.В., Плеухов А.Н. Определение погрешности пересечения уровня в условиях двухлучевого сигнала // Прием и обработка информации в сложных информационных системах: Сборник. - Казань: Изд - во Казан. гос. ун - та, 1988. - Вып.17. - С.57 - 64.

16. Плеухов А.Н., Савельева Т.В. Численное моделирование энергетического спектра сигналов возврата - наклонного зондирования ионосферы // Метеорное распространение радиоволн: Сборник. - Казань: Изд - во Казан.гос.ун-та, 1991. - Вып.22. - С. 65 - 71.

17. Плеухов А.Н., Сидоров В.В. Исследование экранирующего влияния антенн СДВ - диапазона на работу метеорных систем связи // Междунар. симпозиум по ЭМС: Сб. научн. трудов. Ч.1. С.- Петербург, 1993. - С.5 - 10.

18. Бочкарев В.В., Плеухов А.Н., Сидоров В.В. Метеоры в коротковолновом канале связи // XVII Всеросс. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл.- Ульяновск, 1993. - С.53.

19. Desourdis R.I., Sidorov V.V., Huziashev R.G., Kurganov A.R., Epictetov L.A., Pleuchov A.N., Wojtaszek J.H. Nonreciprocity of meteor radio link // Ionospheric Effect Symposium: Proc. of SRI.- Inter. USA, 1994.-P.165-173.

20. Katsevman M.M., Pleuchov A.N., Teplov V.Ju. Investigation of Nonstationary Process in the Ionosphere Leading to Doppler's Distortion of Radio Signals // Proc. of CIT conference , 4-7 Feb .- Austin. Texas. USA , 1997.

21. Bochcarev V.V., Katsevman M.M., Pleuchov A.N., Teplov V.Ju. Determination of the Spectrum of Ionospheres Irregularities by the Experiment // Proc. of CIT Conference , 4-7 Feb.- Austin. Texas. USA , 1997.

22. Ванюшин М.Ю., Плеухов А.Н. Сравнение однократного и многократного рассеяния коротких волн // Межд. конф. " Физика ионосферы и атмосферы Земли": Тез. докл.. - Иркутск - 1998. - С.40 - 41.

23. Бочкарев В.В., Кацевман М.М., Плеухов А.Н. Теплов В.Ю. Оценка спектра размеров неоднородностей нижней ионосферы по данным наклонного зондирования // Геом. и астрономия. - 1998 , №3. - С. 169 - 173.

24. Бочкарев В.В., Кацевман М.М., Петрова И.Р., Плеухов А.Н., Теплов В.Ю. Оценка спектральных параметров сигнала наклонного зондирования ионосферы с помощью методов повышенной разрешающей способности // XIX Всерос. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл.- Казань. - 1999. - С.98 - 99.

25. Бочкарев В.В., Плеухов А.Н. Рассеяние радиоволн в среде, описываемой нелинейным динамическим уравнением // XIX Всерос. конф. по Распространению радиоволн: Тез. докл.- Казань. - 1999. - С.347 - 348.

26. Плеухов А.Н., Бухмин В.С., Малков А.А., Митрофанов М.Е. Коэффициент отражения от ионосферы на частотах, близких к МПЧ // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия.: Сборник статей - Казань. - 1999. - С.95 - 99.

Сдано в набор 13.01.00 г. Подписано в печать 13.01.00 г.
Форм.бум. 60 x 84 1/16. Печ.л. 2. Тираж 100. Заказ 3.

Лаборатория оперативной полиграфии КГУ
420045 Казань, Кр.Позиция, 2а